

Машиностроение и машиноведение

УДК 541.18.052: 672.81.05

doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12

Анализ влияния свойств нанодисперсных систем на конструкции технологического оборудования

А.А. Попова, И.Н. Шубин

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

An Analysis of the Influence of the Properties of Nanodispersed Systems on the Design of Technological Equipment

A.A. Popova, I.N. Shubin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Tambov State Technical University

В настоящее время в промышленности применяют большое количество дисперсных (в том числе и нанодисперсных) материалов, имеющих различные физико-механические и физико-химические свойства. Их необходимо учитывать при разработке и использовании различного технологического оборудования, а также при проведении технологических процессов. Смешивание, иногда являющееся вспомогательным технологическим процессом и широко применяемое во многих отраслях промышленности, определяет качество готовой продукции. Влияние реологических свойств смешиваемых компонентов на процесс приготовления смеси и конструкцию оборудования известно давно. Однако проектировать процессы смешивания и смесители без учета характеристик дисперсных материалов (насыпной и собственной плотности, размера и формы частиц, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, гигроскопичности, адгезивности и др.) затруднительно. Как правило, при рассмотрении технологических процессов и разработке оборудования внимание уделяется производительности, времени процесса, энергозатратам и другим показателям. Однако влияние геометрических параметров оборудования на процесс смешивания и динамику перемещений дисперсных материалов в реакционном объеме не изучено. На примере гравитационного смесителя проведено исследование процесса смешивания дисперсных материалов, имеющих различные размеры и насыпную плотность. Установлены основные факторы, влияющие на качество смешивания и конструктивные параметры оборудования для обработки дисперсных материалов. Даны практические рекомендации для специалистов, занимающихся проектированием смесительного оборудования. Однако они носят общий характер, так как дать однозначные рекомендации проблематично и некорректно вследствие огромного разнообразия дисперсных материалов и, соответственно, их физико-механических свойств, а также особенностей смесителей.

Ключевые слова: физико-механические свойства, дисперсный материал, экспериментальные исследования, гравитационный смеситель, технологическое оборудование

Currently, there is a large number of dispersed and nanodispersed materials used in the manufacturing industry. They have various physicochemical and physicochemical properties that have to be taken into account when developing and using various technological equipment as well as during technological processes. One of the main technological processes is mixing. Being sometimes auxiliary, this process is widely used in many industries, and, ultimately, determines the quality of the finished product. The influence of the rheological properties of the components to be mixed, both on the process of preparing the mixture and on the design of the equipment, has long been known. However, it is challenging to design mixing processes and mixers without taking into account such characteristics of dispersed materials as density (bulk and intrinsic), particle size and shape, coefficient of internal and external friction, hygroscopicity, adhesiveness as well as others. Usually, when considering technological processes and developing equipment, the issues of productivity, process time, energy consumption are given priority. At the same time, the influence of geometric parameters of the equipment on the mixing process and the dynamics of the movement of dispersed materials in the reaction volume has not been sufficiently studied. To address this issue, the authors examined the mixing process of dispersed materials of various sizes and bulk density using the example of a gravity mixer. The main factors affecting the quality of mixing and design parameters of the equipment for processing dispersed materials were established. Practical recommendations are given for specialists involved in the design of mixing equipment. These recommendations are general in nature, since it is problematic and indeed erroneous to give specific recommendations due to the large variety of dispersed materials and, accordingly, their physical and mechanical characteristics, as well as the equipment features.

Keywords: physical and mechanical properties, dispersed material, experimental studies, gravitational mixer, technological equipment

Работа над созданием новых конструкционных материалов и композитов (таких как сорбенты, сверхтвердые материалы, модифицированные полимеры и др.), обладающих уникальными или улучшенными характеристиками, ведется уже давно и является одним из приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса России по созданию инновационных материалов и технологий.

Технологический процесс получения инновационных композитов предполагает использование дисперсных материалов (ДМ), состав которых оказывает существенное влияние на свойства конечного продукта. Значительного улучшения характеристик существующих композитов можно добиться переходом от ДМ с размером частиц $\sim 1 \dots 10$ мкм на нанодисперсные материалы (НДМ) с размером частиц $10 \dots 100$ нм благодаря изменению физико-химических свойств при достижении нанометрового размера частиц.

Это также позволит существенно улучшить имеющиеся композиты или создать материалы с принципиально новыми свойствами. Кроме того, будет наблюдаться значительное увеличение площади поверхности и химической активности, что принципиально для получения новых конструкционных материалов и композитов.

Актуальность проведения исследований процесса смешивания НДМ как между собой, так и с другими ДМ, обусловлена их регулярным использованием в современных технологиях. При этом разработке нового высокоэффективного оборудования для применения в промышленных масштабах способствует изучение поведения НДМ.

Однако моделированию процесса смешивания ДМ и приготовлению композиций, содержащих твердую фазу, посвящено небольшое количество работ. Среди них можно выделить публикации [1–3], в которых рассмотрено смешивание различных ДМ. Их авторы указывают на то, что исследование процесса в целом находится на уровне накопления экспериментальных данных и понимания основных его закономерностей. Что до настоящего времени нет единого взгляда на суть процесса, отсутствует единая терминология, нет обоснованной методики проведения эксперимента и единых критериев в оценке качества смесей.

Перечисленные обстоятельства приводят к тому, что результаты экспериментов разных авторов сложно сравнивать [4–6]. При этом моделирование поведения дисперсных сред носит чисто прикладной характер. Например, в статье [7] рассмотрено имитационное модели-

рование движения сыпучего ДМ в барабанной установке для определения сегрегации и объема пылевой фракции.

В публикациях [8, 9] определены общие закономерности поведения ДМ в зависимости от его свойств в разных смесителях. Анализ возможности применения различных моделей для описания процесса смешивания выполнен в работах [10–12]. В некоторых из этих работ авторы также проверили пригодность модели для расчета и проектирования отдельных узлов и оборудования в целом [13, 14].

Широкое внедрение углеродных наноматериалов для модифицирования и функционализации заставляет учитывать их свойства при проектировании технологического оборудования. К таким НДМ относятся, например, углеродные нанотрубки и графен. Исследованию свойств НДМ посвящено значительное количество работ, авторы которых отмечают полную аналогию свойств НДМ и сыпучих ДМ, в том числе нанопорошков и промышленных пылей [15–19].

Так, в ряде публикаций рассмотрено влияние электростатических свойств НДМ на процесс переработки, общие физико-механические свойства отдельных наночастиц, законы их движения, гигроскопичность и плотность наноматериалов применительно для транзисторов, микроэлектроники и т. д.

Однако во всех работах авторы проводили лабораторные исследования лишь отдельных характеристик НДМ, не учитывая все их параметры, а также условия реальной эксплуатации и расчета оборудования, т. е. отсутствуют публикации, посвященные практическому применению [20–25].

Анализ рассмотренных работ показал, что гравитационное смешивание широко используют в промышленности для приготовления смесей ДМ. При смешивании в гравитационном поле взаимно пересекающиеся или накладывающиеся потоки ДМ имеют хорошую проницаемость для частиц компонентов, что позволяет уйти от неопределенности при рассмотрении динамики потоков смешиваемых материалов и достичь хорошей степени однородности смеси при относительно низких энергозатратах [26].

Цель работы — экспериментальное определение влияния конструкции оборудования (на примере гравитационного смесителя) на процесс смешивания ДМ, включая НДМ, для использования результатов в проектных и техно-

логических мероприятиях по повышению его производительности и качества смесей.

Методика эксперимента. Экспериментальная установка (лабораторный гравитационный смеситель направленного действия) состояла из рамы, двух бункеров, имеющих возможность независимого перемещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, подвижных днищ, направляющих плоскостей и пробоотборника (рис. 1).

Установка работала следующим образом. Подлежащие смешиванию ДМ загружались в бункеры 1 в пропорциях, соответствующих конечной смеси. Их дозирование при смешивании осуществлялось размером зазора между подвижным днищем и стенкой бункера. Материалы, попадающие на наклонные направляющие, двигались по ним, ускоряясь так, что в момент отрыва частиц приобретали определенную скорость вдоль плоскости.

Изменение значения скорости достигалось варьированием угла наклона разгонных плоскостей (направляющих). Частицы материалов летели со скоростью, равной скорости отрыва в поле гравитации, что приводило к разрыхлению встречающихся потоков. В результате этого происходило увеличение расстояния между частицами, их взаимное проникновение из потока в поток и, соответственно, смешивание.

Возможность изменения расстояния между бункерами в двух плоскостях позволяла регулировать место пересечения вееров потоков частиц материалов для поиска их оптимального раскрытия, что является необходимым услови-

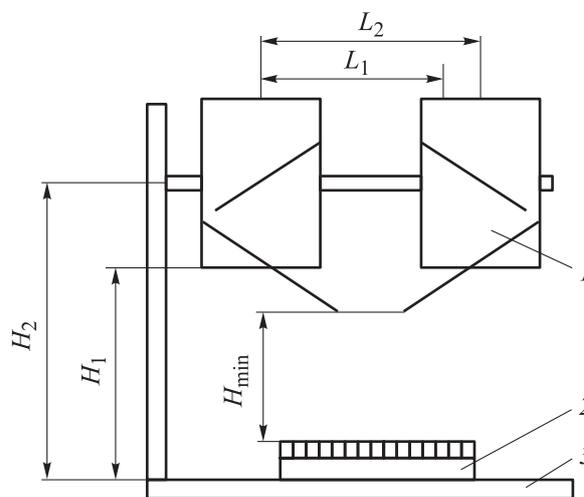


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

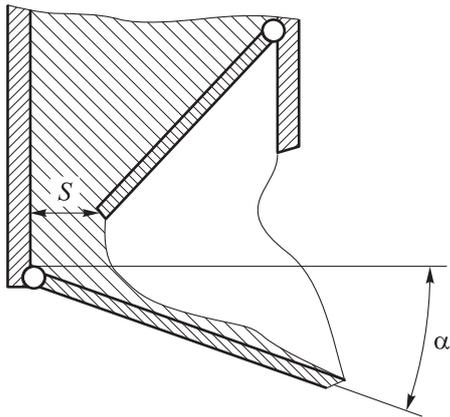


Рис. 2. Схема определения влияния геометрии бункера на скорость и время истечения материала

ем для получения качественной смеси. После этого смешанные материалы попадали в секционный пробоотборник 2, содержащий 12 ячеек (см. рис. 1), установленный на раме 3 в месте сыпания дисперсных компонентов для анализа количества материала или оценки качества смеси.

Таблица 1

Результаты экспериментов по смешиванию ДМ и их смесей при различных геометрических настройках смесителя

Материал	Среднее количество материала, г, в ячейке пробоотборника											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
При параметрах смесителя H_1 и L_1												
Компонент 1	–	–	–	–	0,5	1,7	9,4	13,3	5,0	3,5	1,5	–
Компонент 1	–	0,5	0,7	1,0	1,2	6,5	15,0	9,3	1,0	1,0	0,5	0,7
Смесь 1:												
компонент 1	–	–	0,5	2,8	7,4	6,2	5,1	4,8	2,0	1,3	0,7	–
компонент 2	0,5	0,8	1,3	4,2	6,6	8,1	8,9	8,1	3,4	1,0	0,5	–
При параметрах смесителя H_1 и L_2												
Смесь 2:												
компонент 1	–	–	–	–	0,6	3,2	7,1	4,8	6,6	4,5	3,4	3,3
компонент 2	–	–	–	–	0,9	2,4	3,6	9,1	11,2	4,9	4,7	3,4
При параметрах смесителя H_2 и L_1												
Смесь 3:												
компонент 1	3,0	6,1	9,7	9,8	7,8	2,1	0,5	0,5	0,5	0,5	–	–
компонент 2	0,5	1,5	2,4	7,3	14,5	9,0	3,2	1,0	0,5	0,5	0,5	–
При параметрах смесителя H_2 и L_2												
Смесь 4:												
компонент 1	–	–	–	0,5	0,5	0,5	0,5	4,9	11,3	7,5	5,8	4,0
компонент 2	–	–	1,0	4,8	6,5	5,7	4,4	5,1	2,0	1,0	0,5	0,5
Примечание. Масса материалов менее 0,5 г не учитывалась.												

Экспериментальное исследование состояло из двух этапов. На первом этапе определяли границы раскрытия вееров сыпавшихся ДМ (рис. 2) и исследовали возможность проникновения частиц из потока в поток т. е. их смешивание, для чего бункеры могли независимо перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Используемые материалы имели следующие характеристики: компонент 1 — насыпная плотность $\rho_{\text{ср}} = 820 \text{ кг/м}^3$, средний размер частиц $d_{\text{ср}} = 1,93 \text{ мм}$; компонент 2 — $\rho_{\text{ср}} = 780 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{ср}} = 1,10 \text{ мм}$. Причем для удобства анализа качества полученной смеси из компонента 1 или 2 использовался материал, отличающийся только цветом. Результаты экспериментов по смешиванию ДМ и их смесей при различных геометрических параметрах смесителя — высоте расположения исходных бункеров H_1 , H_2 и расстоянии между ними L_1 , L_2 (см. рис. 1) — приведены в табл. 1, а результаты экспериментов по раскрытию вееров потоков материалов — в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов по раскрытию вееров потоков материалов

Материал	Количество материала, г, в ячейке пробоотборника											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Компонент 1	0	0	0	0	< 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	0
Компонент 2	0	< 1,0	< 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	< 1,0	< 1,0
Смесь 1	< 1,0	< 1,0	< 1,0	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	< 1,0	< 1,0
Смесь 2	0	0	0	0	< 1,0	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5
Смесь 3	< 1,0	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	0	0
Смесь 4	0	0	< 1,0	< 1,0	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	< 1,0	< 1,0

На втором этапе экспериментального исследования определяли влияние размера зазора S и угла наклона направляющей α (см. рис. 2) на скорость и время истечения материалов. Зазор принимали равным 5, 7, 10 и 15 мм при угле наклона направляющей $\alpha = 30, 45$ и 60° .

Для предупреждения возможности появления сводообразования ДМ на днище смесителя, регулирующее размер зазора, налагалась вибрация. Анализ налагаемой вибрации показал, что она не оказывает существенного влияния на истечение ДМ из бункера, так как послойная укладка материала в бункере, отличающегося цветом (рис. 3) не разрушалась. Происходило его плавное истечение по наклонному днищу, отсутствовала циркуляция в объеме материала со смещением разноцветных слоев.

Физико-механические свойства исследуемых материалов приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что конструктивные параметры оборудования существенно влияют на процесс приготовления смеси, а также на ха-

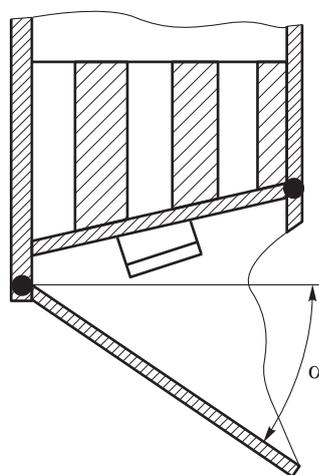


Рис. 3. Схема укладки ДМ для определения влияния налагаемой вибрации

рактеристики движущихся потоков смешиваемых материалов (рис. 4).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для получения качественной смеси ДМ необходимо соблюдать следующие рекомендации по построению обо-

Таблица 3

Физико-механические свойства исследуемых материалов

Материал	Насыпная плотность ρ_{cp} , кг/м ³	Средний размер частиц $d_{cp} \cdot 10^{-3}$, м
Поваренная соль	1500	0,38
Кварцевый песок	1250	0,47
Речной песок	2180	0,26
Цеолит	1750	$(20 \dots 40) \cdot 10^{-3}$
Глина	980	$(20 \dots 100) \cdot 10^{-3}$
Пшено	820	1,93
Калий сернокислый	2740	$(50 \dots 100) \cdot 10^{-3}$
Углеродный наноматериал серии «Таунит»	450	$10 \cdot 10^{-3}$

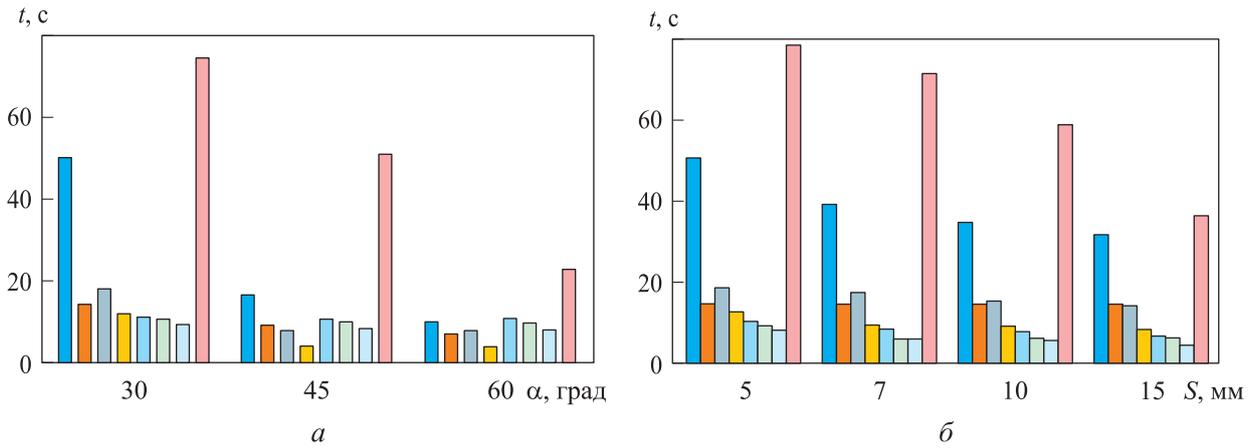


Рис. 4. Зависимости времени истечения t ДМ от угла наклона направляющей α (а) и зазора S (б):
 ■ — калий сернокислый; ■ — цеолит; ■ — глина; ■ — пшено; ■ — кварцевый песок;
 ■ — речной песок; ■ — поваренная соль; ■ — углеродный наноматериал

рудования, в частности гравитационного смесителя:

- выбирать минимальную высоту H_{\min} (см. рис. 1), т. е. такую высоту от ссыпавшего края до приемной емкости, на которой произойдет формирование (полное раскрытие) веера ДМ, необходимое для взаимного проникновения частиц из потока в поток;
- подбирать расстояние между расходными бункерами так, чтобы происходило «наложение» вееров смешиваемых материалов друг на друга в зоне смешивания;
- регулировать изменением угла наклона направляющей скорость истечения компонентов смеси и ширину раскрытия вееров потоков смешиваемых материалов, а размером зазора — производительность смесителя в целом;
- использовать вибрацию для снижения влияния физико-механических свойств материалов на процесс приготовления смеси.

Выводы

1. Анализ результатов экспериментального исследования и литературных источников выявил основные факторы, влияющие на качество смешивания и конструктивные параметры разрабатываемого технологического оборудования на примере гравитационного смесителя.

2. Установлена полная аналогия в поведении дисперсного и нанодисперсного материалов в гравитационном смесителе, что позволяет применять при проектировании оборудования

(в том числе для наноиндустрии) классические подходы и приемы. Это значительно упростит и удешевит аппаратно-технологическое оформление процесса создания инновационного оборудования, отвечающего высоким требованиям получения качественных смесей.

3. Опыты показали ошибочность традиционного подхода к разработке оборудования, не учитывающего влияние его геометрических параметров на процесс смешивания компонентов. Пренебрежение этим влиянием сказывается как на качестве приготовленной смеси, так и на эффективности работы оборудования.

4. Однако полученные результаты проблематично использовать для однозначных рекомендаций по проектированию оборудования, так как они будут не совсем корректными и могут ввести в заблуждение разработчиков вследствие огромного разнообразия ДМ и, соответственно, их физико-механических свойств. Методики их определения, как правило, носят частный характер, применимый для конкретного процесса, и могут лишь обозначить общий подход.

5. Вместе с тем специалистам, занимающимся исследованием и переработкой ДМ и НДМ, будут полезны результаты экспериментов и рекомендации для проведения дальнейших исследований в области описания технологических процессов и проектирования оборудования, исключая или снижающих влияние свойств обрабатываемых материалов на конструктивно-технологические параметры оборудования.

Литература

- [1] Макаров Ю.И. *Аппараты для смешения сыпучих материалов*. Москва, Машиностроение, 1973. 216 с.
- [2] Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. *Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет*. Иваново, ИГЭУ, 2008. 116 с.
- [3] Андрианов Е.И. *Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов*. Москва, Химия, 1982. 256 с.
- [4] Веригин А.Н., Панферов А.А., Емельянов М.В., Незамаев Н.А. Качество смешивания многокомпонентных дисперсных материалов. *Известия СПбГТИ (ТУ)*, 2015, № 31, с. 75–83.
- [5] Коузов П.А. *Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов*. Ленинград, Химия. Ленингр. отд-ние, 1987. 262 с.
- [6] Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. *Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов*. Москва, Наука, 1985. 440 с.
- [7] Wangchai S., Hastie D., Wypych P. Particle Size Segregation of Bulk Material in Dustiness Testers via DEM Simulation. *Particulate Science and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 1, pp. 20–28, doi: 10.1080/02726351.2016.1205688
- [8] Смоловик В.А., Росляк А.Т. Влияние основных свойств сыпучих материалов на характеристики низкоскоростного пневмотранспорта *Теоретические основы химической технологии*, 2007, т. 41, № 6, с. 630–633.
- [9] Селиванов Ю.Т. Движение сыпучего материала в продольном и поперечном сечениях барабанного классификатора. *Вестник ТГТУ*, 2016, № 4, с. 615–623, doi: 10.17277/vestnik.2016.04
- [10] Roessler T., Katterfeld A. Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles. *Powder Technology*, 2018, no. 330, pp. 58–66, doi: 10.1016/j.powtec.2018.01.044
- [11] Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Powder Technology*, 2005, vol. 157, no. 1–3, pp. 128–137, doi: 10.1016/j.powtec.2005.05.019
- [12] Волков М.В., Королев Л.В., Таршис М.Ю. Математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в новом устройстве гравитационно-пересыпного действия. *Фундаментальные исследования*, 2014, № 9–5, с. 960–964.
- [13] Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. *Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств*. Москва, Машиностроение-1, 2004. 120 с.
- [14] Комченко Е.В., Басюк С.П. Влияние материала стенок бункера на истечение различных сыпучих материалов. *Энергосбережение и энергосберегающие технологии в АПК. Сб. науч. тр.*, Зерноград, ФГОУ ДПО Ростовский институт повышения квалификации кадров АПК, 2003, вып. 1, с. 145–149.
- [15] Мищенко С.В., Ткачев А.Г. *Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [16] Таров Д.В., Гурова Т.В., Шубин И.Н. Аппаратурное оформление функционализации нанотрубок стеаратом титана. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 2015, т. 21, № 2, с. 360–366.
- [17] Першина С.В., Першин В.Ф., Ткачев А.Г., Шершукова А.И. К вопросу промышленного использования углеродных наноматериалов. *Приборы*, 2007, № 10(88), с. 57–60.
- [18] Букатин А.И., Феррапонтов Ю.А., Ульянова М.А., Шубин И.Н., Ткачев А.Г. Определение размера частиц углеродных наноструктурированных материалов, полученных пиролизом пропан-бутановой смеси на металлическом катализаторе. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 2007, т. 13, № 1, с. 94–100.
- [19] Першин В.Ф., Алсайяд Т.Х.К., Пасько Т.В., Пасько А.А. Определение углов и коэффициентов трения углеродных наноматериалов. *Ползуновский вестник*, 2018, № 4, с. 184–188.

- [20] Ćitaković N. Physical properties of nanomaterials. *Military technical courier*, 2019, vol. 67, iss. 1, pp. 159–171, doi: 10.5937/vojtehg67-18251
- [21] Guo D., Xie G., Luo J. Mechanical properties of nanoparticles: Basics and applications. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, vol. 47(1), pp. 1–25, doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
- [22] Filippov A.A., Fomin V.M. Determination of the mechanical characteristics of nanomaterials under tension and compression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 991, pp. 1–7, doi: 10.1088/1742-6596/991/1/012020
- [23] Gatoo M.A., Naseem S., Arfat M.Y., Mahmood Dar A., Qasi, K., Zubair S. Physicochemical properties of nanomaterials: Implication in associated toxic manifestations. *BioMed Research International*, 2014, vol. 2014, no. 498420, doi: 10.1155/2014/498420
- [24] Jeon S.K., Jang H.S., Kwon O.H., Nahm S.H. Mechanical test method and properties of a carbon nanomaterial with a high aspect ratio. *Nano Convergence*, 2016, vol. 3, iss. 29, pp. 1–10, doi: doi.org/10.1186/s40580-016-0089-3
- [25] Ćitaković N.M. Physical properties of nanomaterials. *Military Technical Courier*, 2019, vol. 67(1), pp. 159–171, doi: 10.5937/vojtehg67-18251
- [26] Долгунин В.Н., Борщев В.Я. *Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение*. Москва, Машиностроение-1, 2005. 112 с.

References

- [1] Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1973. 216 p.
- [2] Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* [Bulk materials mixing processes: modeling, optimization, calculation]. Ivanovo, ISEU publ., 2008. 116 p.
- [3] Andrianov E.I. *Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov* [Methods for determining the structural and mechanical characteristics of powder materials]. Moscow, Khimiya publ., 1982. 256 p.
- [4] Verigin A.N., Panferov A.A., Emel'yanov M.V., Nezamayev N.A. Quality of mixing of multi-component disperse materials. *Bulletin of St PbSIT(TU)*, 2015, no. 31, pp. 75–83 (in Russ.).
- [5] Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials]. Leningrad, Khimiya. Leningr. otd-niye publ., 1987. 262 p.
- [6] Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of chemical technology processes. Processes for grinding and mixing bulk materials]. Moscow, Nauka publ., 1985. 440 p.
- [7] Wangchai S., Hastie D., Wypych P. Particle Size Segregation of Bulk Material in Dustiness Testers via DEM Simulation. *Particulate Science and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 1, pp. 20–28, doi: 10.1080/02726351.2016.1205688
- [8] Smolovik V.A., Roslyak A.T. Effect of the basic properties of granular materials on the characteristics of low-velocity pneumatic transport. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2007, vol. 41, no. 6, pp. 827–830.
- [9] Selivanov Yu.T. Movement of Bulk Material in the Longitudinal and Cross Sections of the Classifying Drum. *Transactions of the TSTU*, 2016, no. 4, pp. 615–623 (in Russ.), doi: 10.17277/vestnik.2016.04
- [10] Roessler T., Katterfeld A. Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles. *Powder Technology*, 2018, no. 330, pp. 58–66, doi: 10.1016/j.powtec.2018.01.044
- [11] Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Powder Technology*, 2005, vol. 157, no. 1–3, pp. 128–137, doi: 10.1016/j.powtec.2005.05.019

- [12] Volkov M.V., Korolev L.V., Tarshis M.Yu. Mathematical model of bulk materials mixing process in a new tumbler mixer. *Fundamental research*, 2014, no. 9–5, pp. 960–964 (in Russ.).
- [13] Selivanov Yu.T., Pershin V.F. *Raschet i proyektirovaniye tsirkulyatsionnykh smesiteley sypuchikh materialov bez vnutrennikh peremeshivayushchikh ustroystv* [Calculation and design of circulation mixers of loose materials without any internal mixing devices]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 publ., 2004. 120 p.
- [14] Komchenko E.V., Basyuk S.P. Influence of the material of the walls of the hopper on the flow of various bulk materials. *Energoberezheniye i energosberegayushchiye tekhnologii v APK. Sb. nauch. tr.* [Energy saving and energy saving technologies in the agro-industrial complex. Collection of scientific papers]. Zernograd, 2003, iss. 1, pp. 145–149.
- [15] Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2008. 320 p.
- [16] Tarov D.V., Gurova T.V., Shubin I.N. Functionalizing Carbon Nanotubes with Stearate Titanium. *Transactions of the TSTU*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 360–366 (in Russ.).
- [17] Pershina S.V., Pershin V.F., Tkachev A.G., Shershchikova A.I. Issue of industrial use of carbon nanomaterials. *Pribory*, 2007, no. 10(88), pp. 57–60 (in Russ.).
- [18] Bukatin A.I., Ferapontov Yu.A., Ul'yanova M.A., Shubin I.N., Tkachev A.G. Determination of Particles Size of Carbon NanoStructural Materials Produced by Pyrolysis of Propane Butane Mixture on Metal Catalyst. *Transactions of the TSTU*, 2007, vol. 13, no. 1, pp. 94–100 (in Russ.).
- [19] Pershin V.F., Alsayyad T.Kh.K., Pas'ko T.V., Pas'ko A.A. Determination of angles and friction coefficients of carbon nanomaterials. *Polzunovskiy vestnik*, 2018, no. 4, pp. 184–188 (in Russ.).
- [20] Čitaković N. Physical properties of nanomaterials. *Military technical courier*, 2019, vol. 67, iss. 1, pp. 159–171, doi: 10.5937/vojtehg67-18251
- [21] Guo D., Xie G., Luo J. Mechanical properties of nanoparticles: Basics and applications. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, vol. 47(1), pp. 1–25, doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
- [22] Filippov A.A., Fomin V.M. Determination of the mechanical characteristics of nanomaterials under tension and compression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 991, pp. 1–7, doi: 10.1088/1742-6596/991/1/012020
- [23] Gattoo M.A., Naseem S., Arfat M.Y., Mahmood Dar A., Qasi, K., Zubair S. Physicochemical properties of nanomaterials: Implication in associated toxic manifestations. *BioMed Research International*, 2014, vol. 2014, no. 498420, doi: 10.1155/2014/498420
- [24] Jeon S.K., Jang H.S., Kwon O.H., Nahm S.H. Mechanical test method and properties of a carbon nanomaterial with a high aspect ratio. *Nano Convergence*, 2016, vol. 3, iss. 29, pp. 1–10, doi: doi.org/10.1186/s40580-016-0089-3
- [25] Čitaković N.M. Physical properties of nanomaterials. *Military Technical Courier*, 2019, vol. 67(1), pp. 159–171, doi: 10.5937/vojtehg67-18251
- [26] Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya. *Bystryye gravitatsionnyye techeniya zernistykh materialov: tekhnika izmereniya, zakonomernosti, tekhnologicheskoye primeneniye* [Rapid gravitational flows of granular materials: measurement technique, laws, technological application]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 publ., 2005. 112 p.

Статья поступила в редакцию 18.02.2020

Информация об авторах

ПОПОВА Алёна Алексеевна — аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

ШУБИН Игорь Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Information about the authors

POPOVA Alyona Alekseevna — Postgraduate, Department of Engineering and Technology for Production of Nanoproducs. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: aluona.popova.93@list.ru).

SHUBIN Igor Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering and Technology for Production of Nanoproducs. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Попова А.А., Шубин И.Н. Анализ влияния свойств нанодисперсных систем на конструкции технологического оборудования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 3–12, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12

Please cite this article in English as:

Popova A.A., Shubin I.N. An Analysis of the Influence of the Properties of Nanodispersed Systems on the Design of Technological Equipment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 3–12, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография Г.С. Уткина «Словарная технология»

Предложено использовать динамический словарь как средство расширения стандартных структур данных языка C++. Словарь реализуется как сложная структура данных, представленная в виде класса. Использование в структуре данных статистики слов, которые разбиваются на узлы, позволяет существенно расширить спектр решаемых задач. Подход, при котором данные представляются в виде словаря и для работы с которыми используются функции словарного класса, назван автором «Словарная технология».

Дается описание словарных функций и приводятся примеры решаемых на основе словарной технологии задач. Возможности словарной технологии по хранению и доступу к данным использованы для построения модели постреляционной системы управления базами данных. Дается описание постреляционной базы данных и особенностей представления информации. Предлагается язык управления данными, в основе которого лежит словарное представление.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru